

論文

生長応力からみた木材の変形現象

北原 龍士・堤 壽一*・松尾 毅

Wood Deformations Due to Growth Stress Release

Ryushi KITAHARA, Juichi TSUTSUMI* and Takeshi MATSUO

Summary

The mechanism and development of xylem has some influence on wood properties. In the study the deformations in wood were measured before/after felling and heat-treatment with microwaves.

Vertical and leaning trees of *Cryptomeria japonica* D. Don were selected from plantation forests. Both the instantaneous and delayed strain recoveries based on the release of growth stresses in longitudinal and tangential directions in tree stems were determined by using the strain gauge method after felling, cross-cutting and stripping (Fig. 1). To study the after-effects of growth stresses on wood properties, small samples (R:1cm×T:1cm×L:15cm) were cut from wood blocks after stripping (Figs. 1a-d) and from air-dried logs. After soaking thoroughly in water for about two months, samples were heated under the water-saturated conditions (microwave heating), and the dimensional changes (the so-called "set" recoveries) due to growth stress relief were measured by using a length comparator (the accuracy: ± 0.001 mm) after cooling.

*九州大学農学部

Faculty of Agriculture, Kyushu University.

The results obtained in this experiment are as follows :

- (1) In vertical stems, the tangential strains showed expansion owing to removing the growth stresses at the xylem periphery in the stem, and longitudinal strains were contraction as shown in Table 1. For tangential strain recovery, the total amount was rather large as shown in Fig. 3, because after cross-cutting the secondary expansion occurred depending on the release of the longitudinal growth stress in tangential direction in the stem, and joined the primary expansion in tangential direction.
- (2) The distribution and magnitude of longitudinal growth stresses (Fig.2) generated in tree stems were obviously related to both the longitudinal instantaneous strain-recovery (Fig.5) and longitudinal set-recovery (Fig.7) patterns due to the growth stress relief along radial direction in the logs. Additionally, there was an effect of age of tree on instantaneous strain recovery (Fig.5) and set recovery (Fig.7).
- (3) In logs taken from leaning tree stems, the instantaneous strain-recovery (Fig.6) and the set-recovery (Fig.8) patterns based on removing the abnormal growth stress in compression wood were very different from those patterns (Figs.5 and 7) due to growth stress release in normal wood.
- (4) For resoaked air-dried wood left in the room for about ten years, set recovery was apparently found as a result of the growth stress relief as shown in Fig.10.

The growth stresses in tree stems strongly affected the deformations in green wood because of the release of them. Furthermore, the presence of set was confirmed experimentally for air-dried wood left in the room for a long term. Therefore, we will have to consider the history of the growth stress for study on deformations in wood.

要 旨

木材の性質は、林木の木部形成の履歴と深いかわりがある。この研究では、林木の肥大生長にともなって樹幹内に生じる生長応力の存在が、木材の変形現象に与える影響を明らかにした。

生材丸太を横切りすると、木部最外周の周囲方向では、軸方向の生長応力の解放によってひきおこされる2次的な伸びが、1次的な伸びに加わって、周囲方向への伸びの量を増大させた。

樹幹内に発生する軸方向生長応力の分布とその大きさは、軸方向生長応力の束縛から解かれて生じる生材丸太内の瞬間ひずみ回復、あるいはセット回復のパターンと密接に関連した。

圧縮あて材がもつ異常な生長応力の解放によって、生材丸太内に生じる軸方向の瞬間ひずみ回復、あるいはセット回復のパターンは、正常な生長をした樹幹丸太内の生長応力の解放による回復パターンと比べ、著しく異なっていた。

伐倒のあと10数年間、室内に放置して十分に気乾状態に達した丸太から試験片を切り出し、再び飽水状態にもどした。そのあと熱処理を施したところ、明らかに生長応力の解放とみなし得るセット回復を認めることができた。

以上の結果から、木材の変形現象について論議する際には、生立樹幹内はもとより、伐倒のあととも生長応力の履歴を無視できないことがわかった。

1. ま え が き

林木の肥大生長にともなう生じる樹幹内の生長応力は、林木が安全に生立するために極めて有効な働きを行っている。一方、木材利用の立場からみると、生長応力はそりや割れ・裂けなど、不都合な現象とも密接にかかわっている。さらに、樹幹内の生長応力の傾斜が、小径木で著しいこともわかっている。

世界的な森林資源の枯渇から、樹齢と経級が比較的低い造林木からの木材生産が、これからの主流になるとの見方がある。したがって、そのような原木丸太から製材品を木取る場面が多くなれば、生長応力によってもたらされる縦そり^{25,26)}など、木材利用に不都合なもろもろの現象が起こりやすくなると予測される。そこで、今、生長応力と木材の性質や挙動とのかかわりについて、基礎的な知見の集積が急務であろう。

ところで、樹幹内の生長応力の存在は、Dinwoodie⁸⁾の総説にもみられるように、Martley¹⁵⁾によって初めて唱えられたようである。つづいて、Jacobs¹⁰⁾や渡辺^{21,22)}らが生長応力の存在を明確にした。その後、生長応力についての研究は、Boyd^{3,4)}やKübler¹¹⁾などの研究者達によっても手がけられるようになった。そして、1960年代から1970年代半ばにかけて、それらの研究者達のほかにArcher¹⁾や奥山¹⁸⁾なども加わって、樹幹内に生じる生長応力の分布とその大きさ、あるいはその発生のメカニズムについての議論が盛んになった。なかでも生長応力の発生のメカニズムについては、大きくわけて Lignin swelling theory (Lignification theory)^{4,6,7,23,24)}と、Cellulose tension theory (Cellulose crystallisation theory)^{20,14,2)}の2つの仮説に分けられるが、このほかにもさまざまな仮説^{9,28,17)}が唱えられ、いまもってその論議は活発である。これまでの生長応力の研究では、その発生のメカニズムあるいは応力解析についての知見が多く、他方、木材の性質や挙動と生長応力との関係については、未解決の部分を広く残している。

さて、木部が形成される仕組みとそれともなう生じる現象は、木材の性質と深くかかわりあっている。すなわち、樹幹内に生じる生長応力は、木材の性質や挙動に影響を与える典型的なものの一つである。そこで、この論文では生長応力によってもたらされる現象のうち、とくに木材の変形現象にかかわるものについて明らかにする。したがって立木の伐倒から丸太の横切りを経て、木材小試片への切り離し、さらに熱処理によって生長応力の束縛から完全に解放されるまでの過程のなかで、木材の変形現象の解明を試みた。あわせて、あて材部の異常な生長応力にもとづく木材の変形現象についても、検討を加えた。

2. 実 験

2. 1 供試木と供試材

宇都宮大学船生演習林のスギ造林地から、1) 正常に直立して生長をした28年生と76年生のスギ林木をそれぞれ2本づつと、2) 傾いて生長をしたために、圧縮あて材をもっている76年生のスギ林木2本とを供試木として選んだ。なお、圧縮あて材をもつ供試木では、樹幹の曲がりの部分がほぼ胸高部位にあたった。さらに、伐倒のあと3ヶ月間を経過した宮崎産の12年生スギ気乾丸太(正常材)、および10数年のあいだ室内に放置した福岡産の78年生スギ気乾丸太(正常材)をそれぞれ供試材とした。

2. 2 実験方法

2. 2. 1 切断によるひずみ変化量

立木の伐倒から丸太の横切りを経て、木材小試片への切り離しに至るまで、それぞれの段階で、ひずみ変化量をストレイン・ゲージを使って追跡測定した。その手順をFig.1に示している。

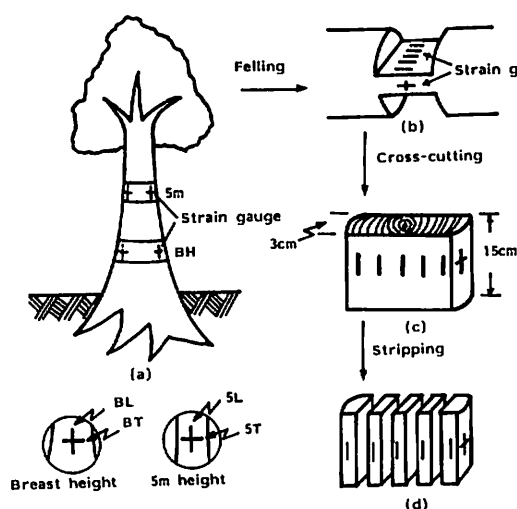


Fig.1. Process of strain measurements.

B : breast height from the ground.

5 : 5 m height from the ground.

L : longitudinal direction.

T : tangential direction.

1) 立木の伐倒 (Felling)

立木の胸高部位と地上高 5 m の部位で、林地斜面の上側と下側にあたる樹幹表面の樹皮をはぎとって現われた木部表面、すなわち木部の最外周に、幹軸方向と周囲方向の 2 方向に防水型ストレイン・ゲージをシアノアクリレート系の接着剤を用いてはりつけた。そのあと、立木を切り倒し、樹幹の軸方向と周囲方向のひずみ変化量を測定した。

2) 丸太の横切り (Cross-cutting)

伐倒した樹幹で、胸高部位と地上高 5 m 部位の樹幹表面にはりつけたストレイン・ゲージの部分を残し、Fig.1(b) に示すように樹幹を 2 方向からくりぬいた。さらに、丸太内横断面上の放射方向の各部位で、軸方向のひずみ変化をもとめるために、Fig.1(b) に図示するように厚板部分の両面にストレイン・ゲージ 5～7 枚をはりつけた。その後、両端の丸太部分を切り落とし、軸方向のひずみ変化を測定した。

3) 小試片への切り離し (Stripping)

Fig.1(c) に示す髄もちの厚板を、Fig.1(d) に示すようにストレイン・ゲージごとの試片に切り離し、生長応力による試片内の束縛を解いて自由にした。小試片への切り離し直後から、軸方向のひずみ変化量を測定し始め、時間経過にともなって生じるひずみ変化を追跡した。

なお、実験をとおして、測定中、試験片の含水率を生材状態に保つようにつとめた。

2. 2. 2 熱処理による長さ変化量

まず、Fig.1(d) に示す木材小試片から、1 cm (R 方向) × 1 cm (T 方向) × 15 cm (L 方向) の角棒を数本切り出し、万能投影機の座標読取り装置 (X-Y 軸、最小読取り値 ± 0.001 mm) を使って生材角棒の長さ (l : 繊維方向、標点距離 10 cm) をもとめた。つづいて、ポリ塩化ビニリデン・フィルムで包んだ生材状態の角棒に、マイクロ波加熱 (出力 : 400 W、発振周波数 2450 MHz) を 3 分間施した。加熱後、熱膨張の影響をさけるために、角棒を冷水中でじゅうぶんに冷却したあと、熱処理後の長さ (l') をもとめた。

その一方で、伐倒のあと 3 ヶ月間および 10 数年間、室内に放置して十分に乾燥させたそれぞれの気乾丸太から、前述の生立樹幹の場合と同じように、髄もちの厚板を切り出し、Fig.1(c) - (d) に示す手順で木材小試片に切り離し、さらにその試片から上述の寸法の角棒を作成した。そのあと、角棒を水に浸し、じゅうぶんに時間をかけて飽水材とした。つづいてこの飽水状態での角棒の長さ (l) を基準にして、上述と同じ方法で熱処理を施し、長さの変化 ($\Delta l = l' - l$) をもとめた。

2. 2. 3 圧縮あて材の識別

圧縮あて材の識別には、胸高部位と地上高 5 m 部位から採取した円盤で、放射方向にそって顕微鏡観察用の切片を切り出し、光学顕微鏡のもとで木部細胞の形態観察を行った。

3. 実験結果と考察

3.1 樹幹丸太の木部最外周でのひずみ回復

立木の伐倒に始まり、木材小試片に至るまでのひずみ挙動を、立木時の木部最外周にはりつけたストレイン・ゲージでもとめた。

伐倒直後のひずみ回復を Table 1 に示す。直立して正常な生長をした28年生と76年生の林木では、胸高部位と地上高5mのいずれでも、軸方向に縮みを生じた。他方、周囲方向では、供試木すべてで伸びを生じた。これらの挙動は、生長応力の解放によってひきおこされた現象である。つまり、正常な樹幹の内部には、Fig.2.に模式的に示すように、幹の軸方向、放射方向、そして周囲方向の3つの方向に常に生長応力が働いている²⁵⁾。したがって、立木の伐倒後の処理によって、樹幹内の生長応力の一部がこれまでの緊張と平衡状態から解かれて上述の現象をもたらしたのである。すなわち、木部最外周では、軸方向に引張り応力、周囲方向に圧縮応力がそれぞれ働いているが、樹幹の束縛から解かれると、軸方向では必然的に縮みを生じ、周囲方向では伸びを生じる。

つぎに、圧縮あて材をもつ供試木について調べた。その結果、正常木とは異なるひずみ変化を示した。すなわち生長応力から解放されるとき、傾いている樹幹の上側の木部最外周では軸方向に縮み、傾いている樹幹の下側では伸びを生じている。これは、傾斜した樹幹の下側の圧縮あて材部では、木部の外周部に圧縮応力が存在したために起こった現象である。しかし、地上高5mでは、傾斜した樹幹の上側と下側ともに、正常木と同様に軸方向に縮みを示し、あて材の影響は認められなかった。

Table 1. Typical instantaneous strain recovery due to felling.

	BL	5 L	BT	5 T
Tree [A]				
upper	-123	-29	+82	+2
lower	-21	-63	+31	+44
Tree [B]				
upper	-270	-121	+57	+71
lower	-35	-45	+80	+86
Tree [C]				
upper*	-85	-101	+44	+35
lower*	+31	-23	+44	+165

Tree [A] : a 28-year-old tree in normal growth.

Tree [B] : a 76-year-old tree in normal growth.

Tree [C] : a 76-year-old tree grown with a lean in the beginning.

upper : at the xylem periphery in the upper side of sloping ground.

lower : at the xylem periphery in the lower side of sloping ground.

upper* : at the xylem periphery on the upper side of leaning tree.

lower* : at the xylem periphery on the lower side of leaning tree.

+ : expansion; - : contraction.

Notations (BL, 5 L, BT and 5 T) are the same as in Fig. 1.

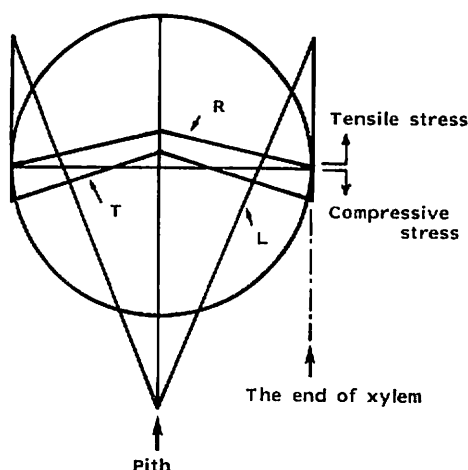


Fig. 2. Schematic diagram of growth stress distribution and magnitude in *Cryptomeria japonica* D. Don tree stem (from Watanabe²⁵).

L : longitudinal direction.

R : radial direction.

T : tangential direction.

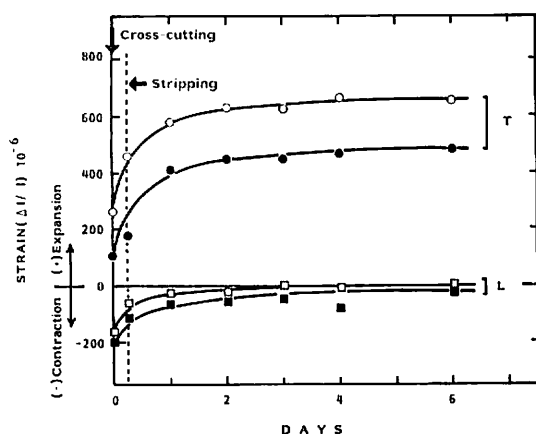


Fig. 3. Typical instantaneous and delayed strain recovery due to growth stress release at the xylem periphery in a log (normal, 28-year-old, BH).

□ : L-upper; ■ : L-lower; ○ : T-upper; ● : T-lower (Notations are the same as in Fig. 1 and in Table 1).

立木の伐倒後、丸太の横切りを経て (Fig. 1 (b)–(c)), 髓もちの厚板から木材小試片に分割したあと (Fig. 1 (c)–(d)), 時間経過とともにひずみの挙動を、木部最外周にはったストレイン・ゲージで追跡した結果を Fig. 3 に示している。横切りの直後、生長応力の解放によって瞬間ひずみ回復が起こり、軸方向に縮みを、周囲方向に伸びをそれぞれ示している。そして小試片に切り離した直後、軸方向に縮みの量を減少しているが、一方、周囲方向にはさらに伸びを示している。そのうえ、小試片に切り離したあと、軸方向と周囲方向とで 2~3 日間、時間の経過とともにひずみが増加しているが、これは遅れ弾性にもとづくひずみ回復¹⁹⁾とみてよいだろう。瞬間的なひずみ回復のあとにつづく、このような遅れ弾性によるひずみ回復の現象については、Tsutsumi¹⁹⁾や Boyd⁵⁾そして Wilkins²⁷⁾などによっても認められている。しかしさらに時間が進むと、このひずみ回復もほとんど認められなくなる。

ところで、木部最外周の周囲方向で、ひずみ変化量が多い。このひずみ変化が得られた丸太表面上の測定箇所は、その両側がすでにくりぬかれ (Fig. 1 (b)), 周囲方向の生長応力の束縛から解放されて周囲方向に自由になっているはずである。しかし、上述のように、横切りによって周囲方向に比較的大きな伸びを示している。このことはいずれの供試材についても同じ傾向が認められた。この現象は、つぎのような説明から理解できそうである。すなわち、丸太を横切りすると、丸太内の軸方向生長応力の解放によって、周囲方向に 2 次的な伸びがひきおこされる。そして、すでに丸太内に存在している 1 次的な周囲方向の伸びにその 2 次的な伸びが追加される^{12, 23, 25)}ことで、周囲方向への伸びの量が大きくなる。しかも、丸太を横切りすることで発生する 2 次的な伸びに遅れ弾性の現象が加わり、横切りしたあともしばらく 2 次的な伸びがつづく²⁶⁾ので、周囲方向への伸びの量がさらに増大したものと推察できる。

3.2 丸太内での軸方向ひずみ回復

丸太の横切りを経て (Fig.1 (b)–(c)), 髓もちの厚板から各木材小試片に分割したあと (Fig.1 (c)–(d)), 時間経過にともなう軸方向ひずみ回復を, 丸太内横断面上の放射方向にそって各部位にはりつけたストレイン・ゲージで追跡した。その結果 (正常材) を Fig.4 に示している。軸方向では, 丸太の中心部から得られた試片で伸びを, 木部の最外周部から得られた試片で縮みを生じている。つまり, 前述の Fig.2 で示した生長応力の分布とその大きさに密接に関連したひずみ回復のパターンだった。またいづれの供試材でも, 横切り直後の瞬間ひずみ回復量が, 髓もちの厚板を小試片に切り離した直後のひずみ回復量, あるいはその後の遅れ弾性にもとづくひずみ回復量よりも値が大きかった。これらのことは, 樹齢あるいは測定部位の地上高が違っても, すべての供試材で同じ傾向だった。

そこで, 丸太内横断面上の放射方向の各部位で, 横切り直後の軸方向瞬間ひずみ回復について, それぞれの供試材で得られた結果をさらに詳細に検討した。Fig.5 には, 正常材の胸高部位で得られた結果を示している。丸太の中心部付近で軸方向に最大の伸びを示し, 木部最外周に向かって伸びの量を次第に減少し, ある部位で全くひずみの変化が認められなくなる。ここから外方では縮みに変化する。縮みの量は, 次第に大きくなって木部最外周で最大となる。つまり, このひずみ回復のパターンは, 樹幹内の生長応力の分布とその大きさ (Fig.2) に密接に関連した結果である。また, 地上高 5 m でも胸高部位と全く同じひずみ回復のパターンを示し, ひずみ回復量もほぼ同じだった。ただし, 樹齢が異なればひずみ回復量に差異を認めた。すなわち Fig.5 に示すように, 28年生の供試木で得られたひずみ回復量に比べて, 76年生の供試木で得られた値はより大きかった。これと類似した傾向を, 遅れ弾性によるひずみ回復量を含めた全ひずみ回復量で Boyd⁵⁾ も認めている。

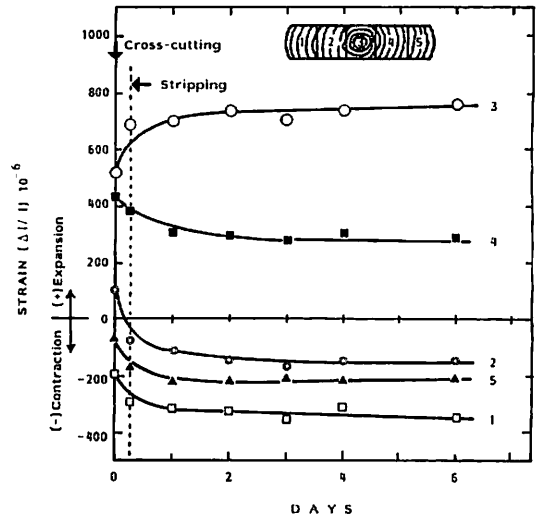


Fig.4. Typical instantaneous and delayed strain recovery due to growth stress release for test specimens from positions from pith to the end of xylem (normal, 28-year-old, BH).

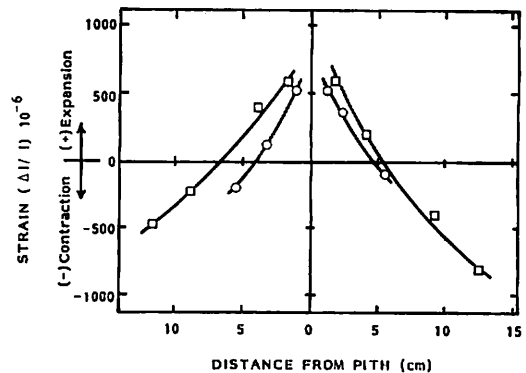


Fig.5. Instantaneous strain recovery due to growth stress release after cross-cutting for test specimens from positions from pith to the end of xylem (normal, BH).

□ : 76-year-old; ○ : 28-year-old.

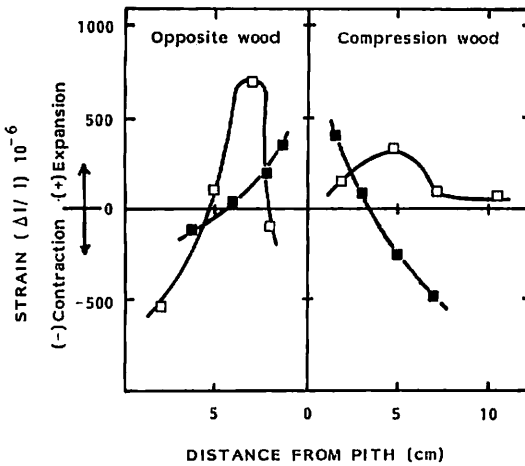


Fig. 6. Instantaneous strain recovery due to growth stress release after cross-cutting for test specimens from positions from pith to the end of xylem (compression wood, 76-year-old).

□ : BH (containing compression wood); ■ : 5m height from the ground.

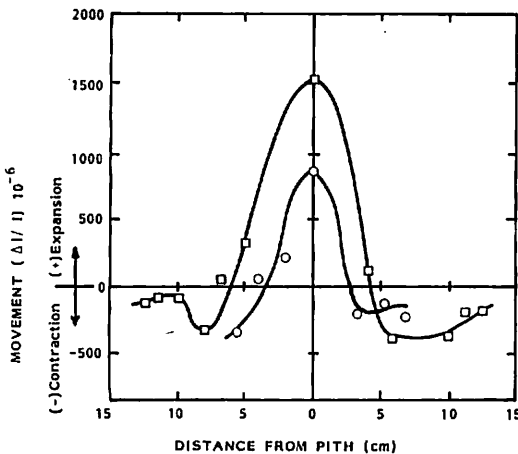


Fig. 7. Set recovery due to growth stress release after heating for green wood specimens from positions from pith to the end of xylem (normal, BH).

□ : 76-year-old; ○ : 28-year-old.

圧縮あて材をもつ供試木から得られた丸太でのひずみ回復は、どうであろうか。丸太内横断面上の放射方向の各部位で、横切り直後の瞬間ひずみ回復について、あて材をもつ胸高部位、そして地上高 5 m で得られた結果を Fig. 6 に示す。あて材をもつ丸太では、前述の正常材の場合 (Fig. 5) とは明らかに異なるひずみ挙動だった。あて材をもつ側では、軸方向に木部の外周部で伸びを示し、内方に向かって、あて材が最も顕著な部位で最大の伸びを生じ、ここから中心部付近まで伸びは次第に減少している。もう一方の側では、木部の外周部で軸方向に最大の縮みを生じており、中心に向かって縮みの量を次第に減じ、ある地点でひずみの変化がなくなる。ここから内方では伸びに変わり、その量は次第に大きくなってある部位で最大の伸びを示し、さらに中心部に向かって伸びの量は急速に減少している。圧縮あて材をもつ部位での軸方向ひずみ回復は、正常材でのひずみ挙動と比べ、より複雑である。

その一方で、圧縮あて材をもつ丸太の地上高 5 m での軸方向ひずみ回復は、Fig. 6 に示すように正常材 (Fig. 5) と全く同様のひずみ回復パターンだった。要するに、この研究で用いた供試木の地上高 5 m では、丸太内の軸方向ひずみ回復にあて材の影響を認めなかった。

3. 3 熱処理による木材の変形現象

3. 3. 1 生材について

髄もちの厚板から切り離した木材小試片では、時間経過にともなってひずみ回復がしばらく認められるが、さらに時間が進むと、もはやひずみ回復も認められなくなる (Fig. 4)。

さて、遅れ弾性によるひずみ回復が認められなくなった生材状態の試片では、生長応力はすべて消失してしまったのだろうか。この生材試片から切り出した角棒に熱処理を施して、その変形現象を調べた。遅れ弾性によるひずみ回復が認められなくなった生材角棒 (正常材) を加熱したとき、軸方向にみられる長さ変化の結果を Fig. 7 に示している。丸太中心部で最大の伸びを生じ、外方に向かって伸

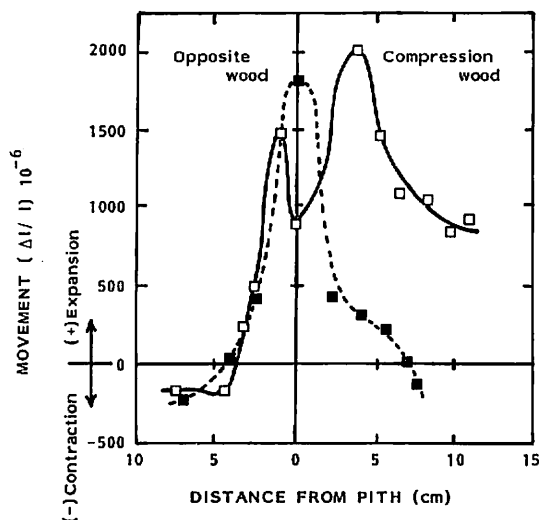


Fig.8. Set recovery due to growth stress release after heating for green wood specimens from positions from pith to the end of xylem (compression wood, 76-year-old).

□: BH (containing compression wood); ■: 5 m height from the ground.

びの量を次第に減少し、ある部位で全く長さの変化が認められなくなる。ここから外方では、長さは縮みに変化して木部最外周に至る。この長さ変化のパターンをみると、Fig.5で得られた丸太の横切り直後の瞬間ひずみ回復の結果と極めて似たパターンであることがわかる。つまりこの現象は、長期間にわたる軸方向の生長応力のもとで起きた塑性ひずみ、いわゆるセット¹³⁾が、熱処理を行うことで、樹幹内の生長応力の分布とその大きさに関連して取り除かれたことを意味している。生材の加熱で、丸太内横断面上の放射方向各部位から得られた軸方向の変形現象については、これとほぼ似た傾向を Tsutsumi¹⁹⁾や Sasaki¹⁸⁾も得ている。

また、Fig.7に示すように、軸方向のセット回復量は、樹齢によって差異が認められた。すなわち、28年生の供試木から得られた試片でのセット回復量は、76年生の供試木から得られた回復量と比較して小さい。この理由については、横切り直後の瞬間ひずみ回復が樹齢によって異なる結果 (Fig.5) ともあわせて、さらに検討が必要である。

正常材の地上高5 mでの、熱処理による軸方向の長さ変化は、胸高部位での結果と同じ傾向を示し、地上高による違いは認められなかった。

熱処理によってひきおこされる生材でのセット回復について、その発生のメカニズムは、細胞壁内の微細構造、あるいは分子オーダーなどの論議^{13,14,20)}でなされてきた。しかし、この問題は生長応力の発生のメカニズムと密接なかわりをもっているので、問題解明にはさらに今後の研究を待たねばならない。

なお、この研究で採用した熱処理法、すなわちマイクロ波加熱処理によると、1回目の3分間処理で生長応力にもとづくセット量の大部分を解放することができた。予備実験の際、同一生材試片に対して数回の熱処理を繰り返して行ったが、いずれも1回目の処理後の長さと比べて、ほとんど違いを認めることができなかった。

圧縮あて材を胸高部位にもつ供試木から、髄もちの厚板を切り出し、その厚板を分割切り出して得られた角棒に熱を加えたとき、軸方向に現われた長さ変化を Fig.8に示す。あて材をもつ側では、木部最外周で明らかに伸びが生じており、丸太内方に向かって、あて材が顕著な部位で最大の伸びを示した。ここから中心部までは次第に伸びを減少している。一方、あて材をもつ側と反対の側では、木部最外周で縮み、内方に向かって縮みを減少し、そのあと縮みが伸びに変わり、伸びの量は中心部に向かって急速に大きくなってある地点で最大値に達する。ここから中心部までは伸びの量が次第に減少している。この圧縮あて材の異常な生長応力の解放によってひきおこされたセット回復のパターンは、あて材をもつ丸太の横切り時の瞬間ひずみ回復のパターン (Fig.6) と類似して複雑である。しかも、あて材側の軸方向の伸びが著しいことは、樹幹内あ

て材部の縦圧縮応力に起因するセット量がきわめて大きかったことをうかがわせる。

また、圧縮あて材をもつ供試木から得られた丸太の地上高5mでは、Fig.8に示すように、熱処理による軸方向長さ変化のパターンが、正常材の結果 (Fig.7) とほぼ同じ傾向を示した。つまり、この供試木の地上高5mでは、あて材の影響が認められなかった。

3. 3. 2 気乾材について

伐倒のあと3ヶ月間、室内に放置し、十分に乾燥して気乾状態に達した丸太から、髓もりの厚板を切り出した。その厚板を分割切り出して前述の角棒を作成し、水に浸して飽水状態にしたあと、熱処理によって軸方向の長さ変化をもとめた。その結果をFig.9に示している。Fig.7に示した生材 (正常材) の熱処理で得られた結果と、全く同じ軸方向長さ変化のパターンである。一度、乾燥して気乾状態になった木材とはいえ、明らかに生長応力の解放によって生じたセット回復を認めた。

そこで、さらに年数を経過した気乾状態の木材で確かめを行った。伐倒のあと、乾燥して気乾状態のまま10数年間、室内に放置した木材を飽水状態にもどし、そのあと熱処理を施した結果を Fig.10 に示す。気乾状態で極めて長い期間が経過したにもかかわらず、生長応力の解放にもとづくセット回復を明確に認めることができる。つまり、伐倒のあと長期間経過した気乾状態の木材といえども、生長応力によるセットの存在が確かめられた。このことは、木材の変形現象について論議する際に、生長応力の影響を無視できないことを示唆している。

4. 結 論

この研究は、林木の肥大生長にともなって樹幹内部に生じる生長応力の存在が、木材の変形現象に与える影響を明らかにすることを目的とした。そこで、立木の伐倒から丸太の横切りを経て、木材小試片への切り離し、さらに熱処理によって生長応力の束縛から完全

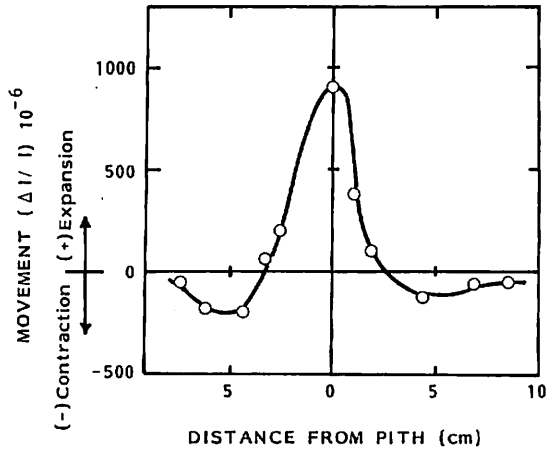


Fig.9. Set recovery due to growth stress release after heating for re-soaked air-dried wood* specimens from positions from pith to end of xylem (normal, 12-year-old, BH).

*: re-soaked air-dried wood left in the room for three months after felling a tree.

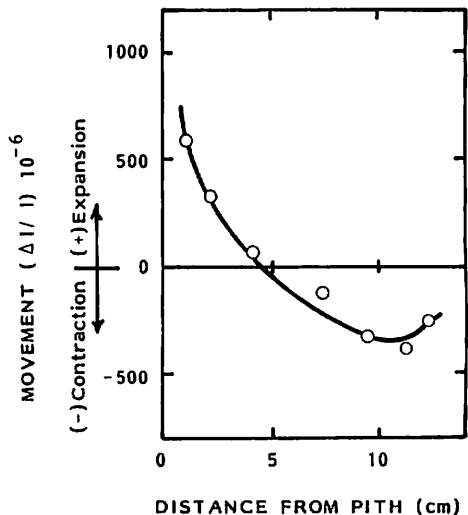


Fig.10. Set recovery due to growth stress release after heating for re-soaked air-dried wood* specimens from positions from pith to the end of xylem (normal, 78-year-old, BH).

*: re-soaked air-dried wood left in the room for about ten years after felling a tree.

に解放されるまでの過程のなかで、木材の変形現象について検討を行った。

その結果をまとめると、つぎのようになる。

1) 生材丸太を横切りすると、木部最外周の周囲方向では、軸方向生長応力の解放によってひきおこされる2次的な伸びが、1次的な伸びに加わって、周囲方向への伸びの量を増大させた。

2) 樹幹内に発生する軸方向生長応力の分布とその大きさは、軸方向生長応力の束縛から解かれて起こる生材丸太内の瞬間ひずみ回復、あるいはセット回復のパターンと密接に関連した。

3) 圧縮あて材がもつ異常な生長応力の解放によって、生材丸太内に生じる軸方向瞬間ひずみ回復、あるいはセット回復のパターンは、丸太内の正常な生長力の解放によるものとは著しく異なるパターンを示した。

4) 生長応力の束縛から自由になって生じる瞬間ひずみ回復、あるいはセット回復では、樹齢の高い林木から得られた回復量のほうが若い林木から得られた値よりも大きかった。

5) 伐倒のあと10数年間、室内に放置して十分に気乾状態に達した丸太から試片を切り出し、再び飽水状態にもどした。そのあと熱処理を施したところ、明らかに生長応力の解放にもとづくセット回復を認めることができた。

以上の結果から、生長応力の影響によってもたらされる木材の変形現象があることを明らかにした。長期間、室内に放置した気乾状態の木材といえども、生長応力によるセットの存在が確かめられた。したがって、木材の変形現象について論議する際に、生長応力の履歴を無視することはできない。

謝 辞

この実験の遂行には、藤城勝利君（宇都宮大学農学部・昭和59年度卒業）の協力に負うところが多い。記して感謝の意を表する。さらに、実験の補助をして下さった宇都宮大学農学部附属演習林・渡辺英雄技官に厚くお礼を申し上げる。

文 献

- 1) Archer, R.R. & F.E.Byrnes: On the distribution of tree growth stresses. Part 1. An anisotropic plane strain theory. **Wood Sci. Technol.** 8, 184-196(1974).
- 2) Bamber, R.K.: The origin of growth stresses. **Forpride Digest** 8, 75-79 (1979).
- 3) Boyd, J.D.: Tree growth stresses. 1. Growth stress evaluation. **Aust. J. Sci. Res. B.** 3, 270-293 (1950).
- 4) Boyd, J.D.: Tree growth stresses. 3. The origin of growth stresses. **Aust. J. Sci. Res. B.** 3, 294-309 (1950).
- 5) Boyd, J.D. & K.B. Schuster: Tree growth stresses. Part 4. Visco-elastic strain recovery. **Wood Sci. Technol.** 6, 95-120 (1972).
- 6) Boyd, J.D.: Tree growth stresses. Part 5. Evidence of an origin in differentiation and lignification. **Wood Sci. Technol.** 6, 251-262 (1972).
- 7) Boyd, J.D.: The key factor in growth stress generation in trees. Lignification or crystallisation? **IAWA Bull. n. s.** 6(2), 139-150 (1985).
- 8) Dinwoodie, J.M.: Growth stresses in timber, a review of literature. **Forestry** 39, 162-170 (1966).

- 9) Hejnowicz, Z. : Some observations on the mechanism of orientation movement of woody stems. **Amer. J. Bot.** 54, 684-689 (1967).
- 10) Jacobs, M.R. : The fibre tension of woody stems, with special reference to the genus *Eucalyptus*. **Comm. Forest. Bur. Aust. Bull.** 22 (1938).
- 11) Kübler, H. : Studien über Wachstumsspannungen des Holzes. Erste Mitteilung. Die Ursache der Wachstumsspannungen und die Spannungen quer zur Faserrichtung. **Holz Roh. Werkst.** 17(1), 1-9 (1959).
- 12) Kübler, H. : Studien über Wachstumsspannungen des Holzes. Zweite Mitteilung. Die Spannungen in Faserrichtung. **Holz Roh. Werkst.** 17(2), 44-54 (1959).
- 13) Kübler, H. : Studien über Wachstumsspannungen des Holzes. Dritte Mitteilung. Längenänderungen bei der Wärmebehandlung frischen Holzes. **Holz Roh. Werkst.** 17(3), 77-86 (1959).
- 14) Kübler, H. : Role of moisture in hygrothermal recovery of wood. **Wood Sci.** 5(3), 198-204 (1973).
- 15) Martley, J.F. : Theoretical calculation of the pressure distribution on the basal section of the tree. **Forestry** 2(1), 69-72 (1928).
- 16) 奥山 剛, 木方洋二 : 樹幹の残留応力発生機構に関する考察. **木材学会誌** 21(6), 335-341 (1975).
- 17) 奥山 剛 : 樹木の生長応力. **木材工業** 39(10), 467-472 (1984).
- 18) Sasaki, Y. & T.Okuyama : Residual stress and dimensional changes on heating green wood. **Mokuzai Gakkaishi** 29(4), 302-307 (1983).
- 19) Tsutsumi, J. : Preliminary report on growth stresses in fast-growing tree stems of *Pinus radiata* and *Eucalyptus regnans*. New Zealand F.R.I. Report No. FP/WQ 40 (1980)(unpublished).
- 20) Wardrop, A.B. : The formation and function of reaction wood. In: Cellular ultrastructure of woody plants (ed. W. A. Côté). 371-390. Syracuse Univ. Press, New York (1965).
- 21) 渡辺治人 : 樹幹の内応力に就て (予報). **日本林学会誌** 24(3), 135-137 (1942).
- 22) 渡辺治人 : 樹幹の内応力に就て(1), スギ及びヒノキの樹幹内応力. **日本林学会誌** 26(3), 104-110 (1944).
- 23) 渡辺治人 : 樹幹の成長応力. **材料** 12(121), 709-713 (1963).
- 24) Watanabe, H. : A study of the origin of longitudinal growth stresses in tree stems. Proc. IUFRO Sect.41 Meeting, 3. Melbourne (1965).
- 25) 渡辺治人 : 樹幹丸太の特性. 九大農木材理学教室研究資料 No.67-1, 1-33 (1967).
- 26) 渡辺治人 : 生長輪. p.1-78. 東京農大木材工学研究会 (1974).
- 27) Wilkins, A.P. : Private communication from Mr A.P.Wilkins(Forestry Commission of N. S. W., Australia)(1984).
- 28) Wilson, B. F. : The development of growth strains and stresses in reaction wood. In: Xylem cell development (ed. J. R. Barnett).275-290. Castle House Publ., Kent (1981).
- 29) Yokota, T. & H.Tarkow : Changes in dimension on heating green wood. **Forest Prod. J.** 12(1), 43-45 (1962).